

論文内容の要旨

X-ray Investigation of Non-thermal Emission Processes in Gamma-ray Binaries

X線を用いたガンマ線連星系における 非熱的放射機構に関する研究

岸下 徹一

はじめに

ガンマ線連星は、最近あいついで発見された TeV ガンマ線で明るい銀河系内の天体であり、極めてコンパクトな宇宙の高エネルギー粒子加速器と目されている。X線で輝く連星、X線連星は、X線天文学の初期から研究が盛んに行われてきた。X線連星では、中性子星あるいはブラックホールに分類されるコンパクト天体が、通常の星と連星系を形成し、星風の一部がコンパクト天体に重力的に降着することで熱的に放射する成分でX線放射が説明されてきた。ところが最近、このX線連星の中から、LS 5039、LS I+61 303、Cygnus X-1、PSR B1259-63の4つの天体から TeV ガンマ線が検出され、これらはガンマ線連星と呼ばれるようになった。TeV ガンマ線放射は、連星系で 10^{12} eV ものエネルギーに達する粒子加速が起きていることを意味し、非熱的放射源を新しく要求する。

連星系における伴星が大質量星の場合、コンパクト天体の周りには、星表面からの放射による強い光子場が形成される。この光子が紫外から可視光に分布する場合、高エネルギーにまで加速された電子は、これらの光を逆コンプトン散乱 ($e^\pm + \gamma \rightarrow e^\pm + \gamma'$) で叩きあげることによって GeV/TeV ガンマ線を作り出すとともに、作り出された高エネルギーガンマ線は $\gamma\gamma \rightarrow e^+e^-$ の過程により強く吸収を受ける。たとえ、電子加速(注入)レートが一定であったとしても、観測されるガンマ線は逆コンプトン散乱が持つ角度依存を反映して変動するはずであり、さらに、吸収の光子密度依存から、観測されるガンマ線フラックスは変動が予想される。ガンマ線連星は、連星系であるが故に、内在する加速器とその環境を観測的に探ることができる天体として、H.E.S.S. 望遠鏡によって初めて TeV ガンマ線フラックスが軌道周期と同期していることが発見されて以来、重要な位置を占めることとなった。

TeV ガンマ線を生み出す高エネルギー電子は磁場中でシンクロトロン X線を放射する。X線の帯域では光子場による吸収が効かないため、磁場と電子加速レートが一定であった場合は、X線に変動は見られないはずである。また、ガンマ線とX線の二つの領域で非熱的なスペクトルを比較することで、加速電子の性質と放射領域の磁場に制限を付けることが可能である。従ってX線観測はガンマ線連星系を研究する上で非常に重要な役割を果たす。しかし、従来行われてきたX線観測は、連星系の軌道

周期に対して、非常に限られた期間の観測しか行われてこなかった上、高いエネルギーの電子からの放射を反映する硬 X 線領域では、観測装置の感度が低く、スペクトルの観測すら十分に行われていない。

本研究では、X 線天文衛星「すざく」によるガンマ線連星系の観測的研究を行い、その放射機構の理解に迫ることを目的として、ガンマ線連星 LS 5039 と、過去の観測からガンマ線連星の可能性が指摘されてきた Cygnus X-3 の研究を行った。 γ - γ 吸収反応によって生成された電子・陽電子対は、逆コンプトン散乱によってガンマ線を発生させるが、 γ - γ 吸収の光学的厚さが大きい場合 ($\tau_{\gamma\gamma} \gg 1$) は、これらのガンマ線は再び吸収を受け、2 つの物理プロセスが連続的に起こる電磁カスケード反応が生じる。このカスケード反応は、従来の解析的なモデルでは扱うことが難しい。そこで我々は、ガンマ線光子の輸送過程を一つ一つ追うことが可能なモンテカルロ法にもとづくシミュレータを開発し、多波長的な解析を行った。

すざく衛星によるガンマ線連星 LS5039 の観測と多波長的研究

2005 年 7 月に打ち上げられた日本の X 線天文衛星「すざく」は、その広い観測帯域と高い検出感度の特徴を持つ。我々は、このすざく衛星を用いて 3.9 日間の LS 5039 の連星周期を完全にカバーする、かつてない長期観測を実施した。LS5039 は銀河面に近いため、検出器固有のバックグラウンドの変動の他、銀河リッジ成分について定量的に解析を行い、最終的に 1 keV から 40 keV の硬 X 線領域にいたるまでの光度曲線を初めて得る事ができた。図 1(左) にすざく衛星で得られた X 線の光度曲線と H.E.S.S. 望遠鏡で得られた TeV ガンマ線の光度曲線を示す。2 つの異なるエネルギー帯域において光度曲線は驚くべき変動の類似性を示しており、TeV ガンマ線と X 線は共に伴星の周りをまわるコンパクト天体の軌道位置に従って変動し、正確な周期性を示していることが初めて明らかになった。われわれは、このような周期性が、定常的に得られるものであるかを調べるために、XMM-Newton、Chandra などの X 線天文衛星の観測結果の再解析を行い、フラックスと光子指数の軌道による変化は、過去の観測で得られた結果と 10% 以内で一致しており、LS 5039 の変動の周期性は非常に安定していることを見いだした。また、X 線連星系においてしばしば観測されてきた降着円盤の状態遷移やバースト現象は見られない。

得られたスペクトルは単純なベキ関数で近似され、統計の範囲で 70 keV までスペクトルの折れ曲がりには検出されない(図 1(右))。また、低エネルギー側の吸収は、軌道による変化が観測されず、視線方向の吸収量で説明される。また、鉄輝線や降着円盤からの熱的放射成分は検出されなかった。X 線の強度は軌道周期の間に、約 2.5 倍の範囲で変動し、TeV ガンマ線の約 8 倍よりは小さい。スペクトルのベキ (Γ) は、軌道位置に応じて 1.45 から 1.60 と変化する。70 keV までの硬 X 線領域で、軌道の各位相でスペクトルを決定したのは本結果が初めてである。スペクトルの形、およびその時間変動は、X 線が非熱的放射であること、さらに TeV ガンマ線と同一の放射起源であることを強く示唆する。X 線での放射を加速された電子からのシンクロトロン放射、TeV ガンマ線を同一分布の電子による伴星からの光子の叩き上げ(逆コンプトン散乱)と考えると、衝撃波加速の考え方から予想される分布 ($\propto \gamma_e^{-2}$) と一致することから、我々は X 線の放射起源をシンクロトロン放射と結論づけた。この場合、TeV ガンマ線に対する X 線の強度は、そのまま放射領域における磁場の強さを与え、1 ガウス以上と決定される。

TeV ガンマ線の変動と同時に、X 線放射の変動を、それぞれのスペクトルのベキと共に説明することは、従来の放射による加速電子のエネルギー損失(シンクロトロン放射、逆コンプトン散乱)を考慮するだけでは難しい。これは、1 ガウス以上の強磁場中では、シンクロトロン冷却によって、得られる逆コンプトン散乱のスペクトルが高エネルギーにまで伸び得ないためである。本研究において、非放射的な効果として断熱膨張によるエネルギー損失を導入することで、X 線と TeV ガンマ線のデータを良く説明できることがわかった(図 2)。すざくのデータは、この断熱膨張によるエネルギー損失のタイムスケールに ~ 1 s を要求する。断熱膨張によるエネルギー損失は、磁気流体力学的な効果と関連しており、通常、観測からその影響を認識することは難しい。しかし LS 5039 の系では、すざくの観測によって初めて、そのエネルギー損失率が軌道に従ってどのように変化していくかを見積もることが可能となった。これは冷却と加速の釣り合いからこの連星系における粒子加速のタイムスケールが ~ 1 s であることを意味する。相対論的膨張を仮定すると、加速・放射領域は $\sim 10^{11}$ cm と見積もることができる。我々の結果は、LS5039 における粒子加速が狭い領域で極めて効率的に生じていることを示す。

我々は、より定量的な解析を行うために、新たに開発したモンテカルロ法に基づく計算コードを用い、LS5039 のジオメトリとカスケード反応を考慮した計算を行った(図 3)。その結果、1 TeV 以下の

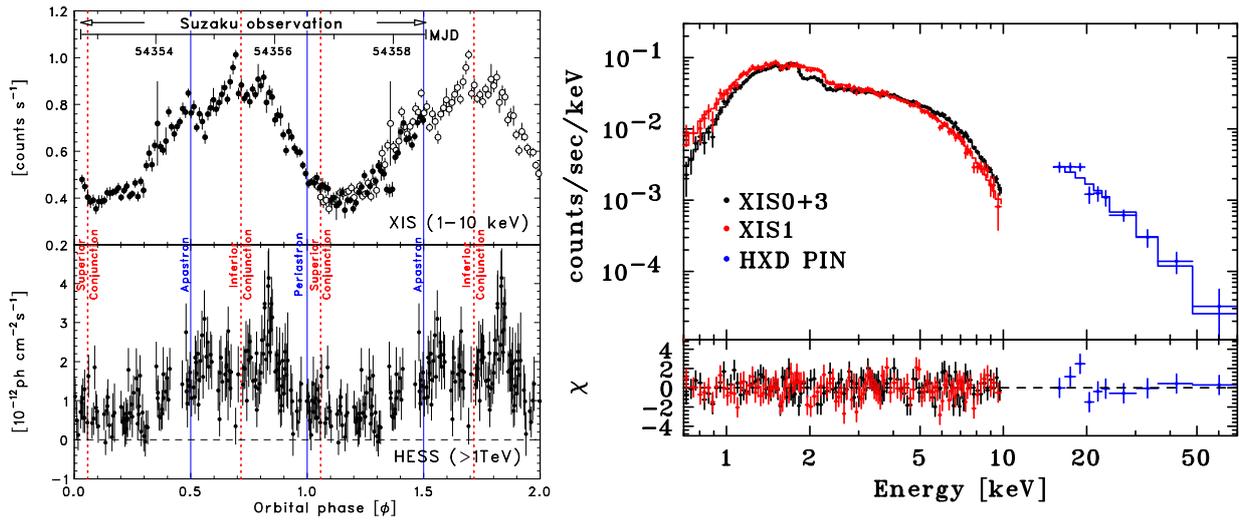


Figure 1: (左図) すざく衛星で検出された LS 5039 の軌道周期に同期した X 線光度曲線 (上図) および H.E.S.S. 望遠鏡で得られた TeV ガンマ線の光度曲線 (下図)。 (右図) LS 5039 からのシンクロトロン X 線スペクトルと検出器応答を考慮したベキ関数によるモデル。下は観測データとベキ関数モデルとの残差を表す。黒及び赤線は X 線 CCD カメラである XIS のデータ、青線は HXD-PIN のデータ。

ガンマ線に関しては、H.E.S.S. 望遠鏡で得られた光度曲線、および光子指数の軌道による変化が連星の軌道パラメータだけで決定付けられることが裏付けられた。1 TeV 以上のガンマ線は、カスケード反応を考慮した場合でも強い γ - γ 吸収の影響によって、H.E.S.S. 望遠鏡で得られた 30 TeV まで伸びるガンマ線スペクトルを実現することは不可能であることがわかった。これは、放射領域がコンパクト天体から離れた場所で生じていることを示唆するものである。

Cygnus X-3 における放射領域への制限

Cygnus X-3 は相対論的電波ジェットを伴う X 線連星である。我々はすざく衛星を用いた観測を行い、その解析結果から、過去の観測でも確認されている、軌道に同期した X 線フラックスの変動が 40 keV 以上の硬 X 線帯域では、見られないことを確認した。X 線スペクトルが黒体輻射とベキ関数 ($\Gamma \sim 3$) で表されることから、硬 X 線帯域まで伸びるベキ関数の成分が、黒体輻射とは別の領域で放射されている可能性が強く示唆される。我々は、散乱の光学的視野を計算し、放射領域が伴星までの距離程度離れていれば、硬 X 線フラックスの変動が見えなくなることを示した (図 4)。加速が高エネルギーに及ぶ場合、発生するガンマ線は、伴星からの可視光だけでなく、黒体輻射の X 線によっても吸収される。本論文では、この吸収によってガンマ線がどのように検出されるかを計算し、GeV 帯域におけるフラックスが十分高ければ、最近打ち上げられたガンマ線観測衛星 Fermi によって、Cygnus X-3 の連星軌道に制限が付けられることを示した。

まとめ

本研究では、ガンマ線連星およびその候補天体から LS5039 および Cygnus X-3 に着目し、その観測を行うとともに、多波長にわたる放射機構を議論した。特に、LS5039 においては、この天体が、これまで議論されてこなかった新しい「非熱的放射」のみで輝いている天体であることを示し、X 線から硬 X 線の変動は、断熱膨張によって引き起こされる事を示した。この天体では、加速が ~ 1 秒という、極めて早いタイムスケールで加速が起こっていることが示される。モンテカルロ計算に基づく手法により、解析的には困難な、連星系のジオメトリや、カスケード反応を考慮した解析が可能となる。本研究で開発したモンテカルロシミュレータは、LS 5039 以外のガンマ線連星系においても適用でき、今後 TeV 望遠鏡や Fermi 衛星によって発展するであろうガンマ線連星系の理解を進めるために有用である。

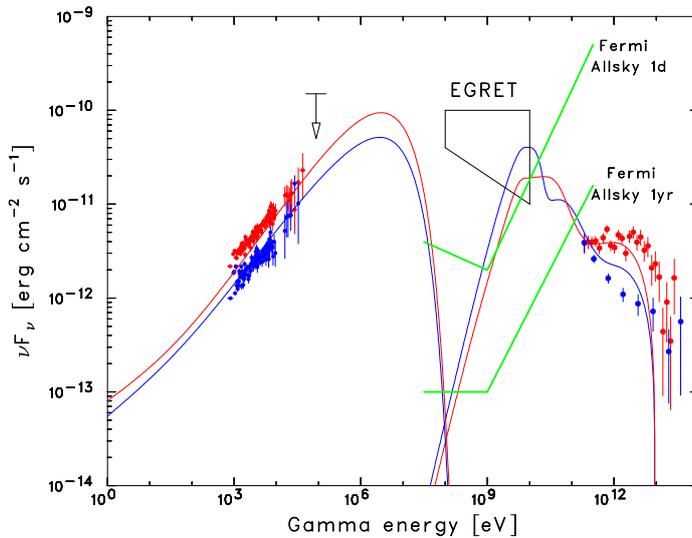
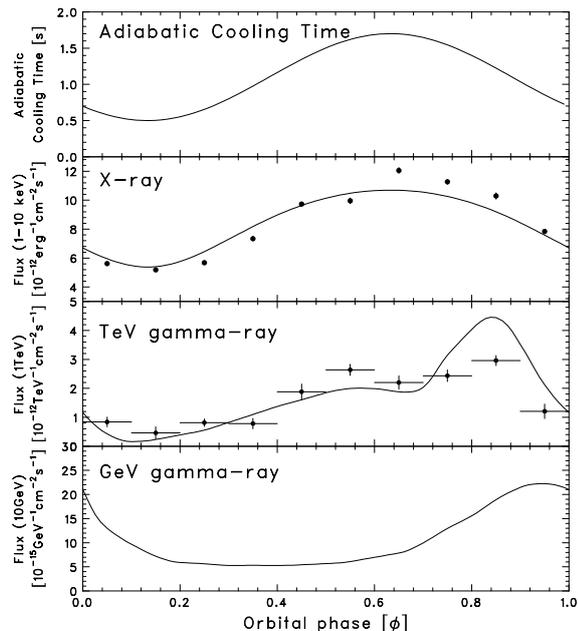


Figure 2: (左図) 上段から断熱膨張によるエネルギー損失、モデルで予測される X 線、TeV ガンマ線、GeV ガンマ線の光度曲線を示す。(右図) すざく衛星で得られた X 線と H.E.S.S. 望遠鏡による TeV ガンマ線のスペクトル。曲線は加速電子からのシンクロトロン放射とガンマ線の吸収を考慮した逆コンプトン散乱による放射モデルを示す。青と赤はそれぞれ伴星に近い場合と遠い場合を示している。

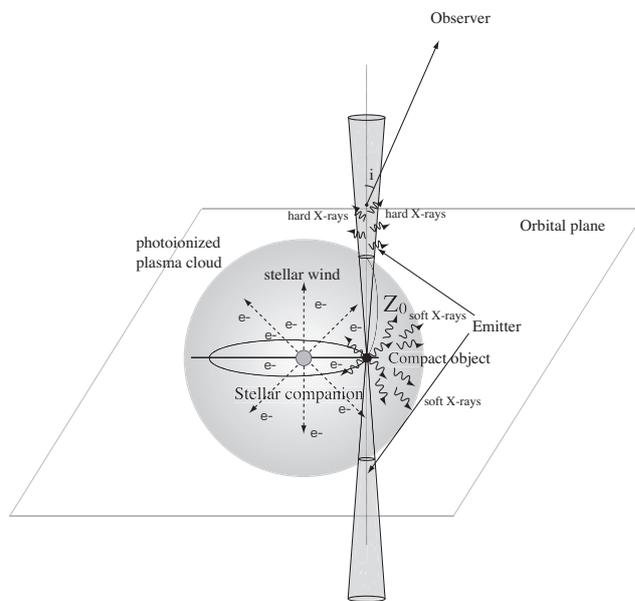
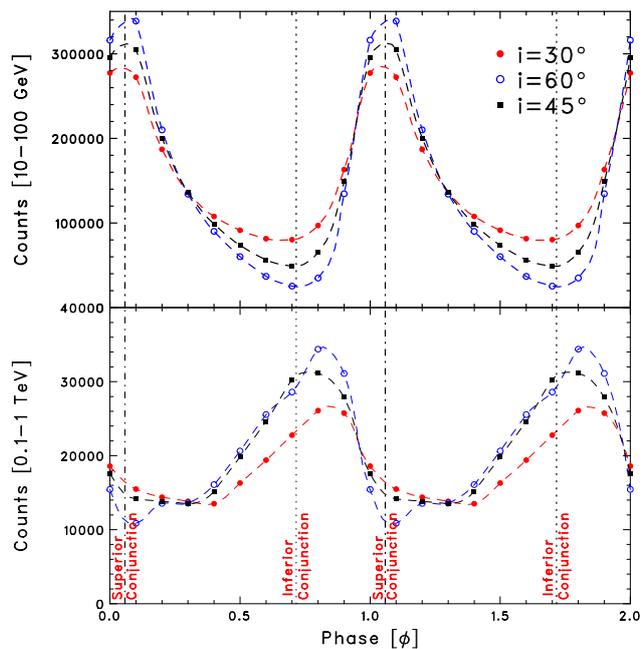


Figure 3: モンテカルロ法を用いて、電磁カスケード反応を考慮した場合に予想される GeV ガンマ線 (上図)、TeV ガンマ線の光度曲線 (下図)。

Figure 4: Cygnus X-3 におけるコンパクト天体近傍での物理状態。